

## 结构设计制造

## 不同结构尺寸对 EPP 保温箱保温性能的影响

余永涛<sup>1</sup>, 潘嘹<sup>1,2</sup>, 卢立新<sup>1,2</sup>

(1.江南大学, 无锡 214122; 2.江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 无锡 214122)

**摘要:** **目的** 研究传热过程中不同结构尺寸 EPP 保温箱的保温性能, 以及 EPP 保温箱内相变材料的相变过程及融化时间。**方法** 运用有限元软件构建 EPP 保温箱热传导模型和相变材料的相变传热模型, 将相变材料完全融化所经历的时间作为有效保温时间, 并以有效保温时间的长短评价保温箱的保温性能。**结果** 传热过程中, 在保温箱内容积、箱体厚度和箱盖厚度均相同的条件下, 内外表面积几何平均值越小, 保温时间越长, 且长宽比值在 1.8~2.0 之间时, 内外表面积的几何平均值最小。**结论** 进行保温箱结构设计时, 适当控制长宽比可减小内外表面积的几何平均值, 从而有效提高保温箱的保温能力。

**关键词:** EPP; 有限元分析; 保温箱; 保温时间

**中图分类号:** TB485.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)09-0114-05

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.09.020

## Effect of the Structure Size of EPP Boxes on Insulation Performance

YU Yong-tao<sup>1</sup>, PAN Liao<sup>1,2</sup>, LU Li-xin<sup>1,2</sup>

(1.Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2.Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi 214122, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the thermal insulation performance of EPP insulating box with different structure sizes in the process of heat transfer, and the phase change process and melting time of the phase change material in the EPP insulating box. The finite element software was used to construct the heat transfer model of EPP insulating box and the phase change heat transfer model of phase change materials. The time in which the phase change material was completely melted was taken as the effective holding time, and the length of the effective holding time was used to evaluate the insulation performance of the insulating box. In the heat transfer process, when the inner volume, insulating box thickness and lid thickness were the same, the smaller the geometric mean of the internal and external surface areas, the longer the holding time. When the length-width ratio was between 1.8 and 2.0, the geometric mean of internal and external surface areas was the smallest. In the process of structure design of insulating box, the appropriately controlled length-width ratio can reduce the geometric mean of the internal and external surface areas, thus effectively improving the insulation performance of the insulating box.

**KEY WORDS:** EPP; finite element analysis; insulating box; holding time

温度敏感性产品需要冷链物流来运输, 其中的各环节均需满足一定的温度要求, 相变材料具有储能密度大、温度稳定等优点<sup>[1]</sup>, 因此相变储能技术被广泛运用到冷链物流中<sup>[2]</sup>。冷链物流控温箱常用的保温材料为 EPS, PU 和 EPP, 其中 EPP 具有良好的热稳定性, 优异的抗震性能、抗冲击强度和韧性, 适宜、柔顺的表面, 是高质量保温箱的理想材料<sup>[3]</sup>, 但 EPP 保温箱没有统一的标准, 而且保温箱理论模型的预测时

间一般小于实际保温时间<sup>[4]</sup>, 即蓄冷剂的实际使用量一般大于理论值, 故对基于保温箱的保温理论进行研究显得尤为迫切。我国冷链物流行业正在快速发展<sup>[5]</sup>, 但还存在着很多的问题, 例如“最后一公里”的冷链脱节现象、包装难度大等<sup>[6]</sup>, 这些都制约着冷链物流业的进一步发展。

目前一些国内外学者通过模型与实验相结合的方法对控温包装系统进行了研究。Qian 提出了将长方

收稿日期: 2017-02-06

作者简介: 余永涛 (1990—), 男, 江南大学硕士生, 主攻食品包装技术安全。

通信作者: 卢立新 (1966—), 男, 博士, 江南大学教授、博导, 主要研究方向为包装技术与装备等。

体模型转换成球壳模型的转换公式<sup>[7]</sup>；郭晓娟进一步研究得出转换公式的适用范围为长宽比值小于 2 的长方体模型<sup>[8]</sup>；赵艳冰指出可将长宽比值大于 2 的长方体模型转换成圆柱体模型<sup>[9]</sup>。Burgess 利用融冰法测得恒温环境下系统热阻与壁厚等结构的关系<sup>[10]</sup>；Matsunaga 等进一步研究得出保温箱在循环温度下的保温性能<sup>[11]</sup>。这些研究中均得到了相应的模型计算式，但均未涉及保温箱结构设计的几何参数。

这里在保温箱内容积和厚度一定的条件下，基于模拟分析研究内外表面积几何平均值与保温时间、表面积几何平均值与长宽比之间的关系，为保温箱结构设计提供直接的依据。

1 EPP 保温箱热分析模型

保温箱的融冰实验属于多因素实验，周期长，成本较高。计算机模拟技术成本较低，模拟时间较短，且随着计算机技术的快速发展和普及，传热学领域已广泛地使用有限元模拟软件。

1.1 EPP 保温箱有限元模型

由于大多数实际问题难以得到准确解，而有限元分析不仅计算精度高，而且能适应各种复杂形状，因而成为行之有效的工程分析手段<sup>[12]</sup>。有限元分析的基本思路是把求解域离散成有限个单元，从而求得总刚度矩阵，然后通过适当的数值方法进行求解<sup>[13]</sup>。传统的有限元软件 Ansys 适用于单物理场分析<sup>[14]</sup>，而 Comsol 较适用于包含相变传热的多物理场分析<sup>[15]</sup>，因此这里选用 Comsol 作为建模软件。有限元模型见图 1，研究模型尺寸为 260 mm×165 mm×190 mm(外尺寸)，220 mm×125 mm×145 mm(内尺寸)，壁厚为 20 mm，盖厚为 25 mm。

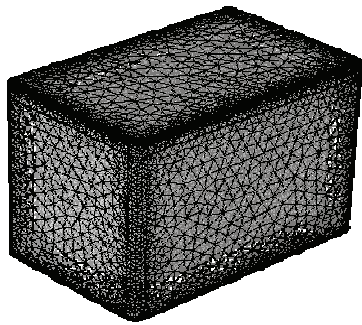


图 1 EPP 保温箱有限元模型  
Fig.1 Finite element model of EPP insulating box

1.2 有限元模型传热参数设置

为有效开展分析，对该模型进行如下假设：保温材料各向同性；冰块与保温箱之间紧密贴合；外界通过热传导进入保温箱内的热量全部被冰吸收；不考虑材料属性随温度的变化。在 Comsol 中添加固体传热

物理场节点，并添加相变材料子节点；冰的相变温度为 0℃，相变潜热为 333 kJ/kg。模型初始温度为 -2℃，外界环境温度为 42℃。

2 EPP 保温箱热分析实验验证

2.1 材料与仪器

主要材料：EPP 保温箱（尺寸与有限元模型相同），选取的蓄冷剂（相变材料）为冰，其蓄冷密度高，相变温度稳定且易获得，是理想的试验材料<sup>[16]</sup>。主要仪器：热特性分析仪，KD2 Pro，量程为 0.02~2.00 W/(m·K)，精度为±0.01 W/(m·K)，美国 DECAGON；恒温恒湿箱，THS-D7C-100AS，控温范围为 203~423 K，温度精度为±0.2 K，控湿范围为 10%~98%，相对湿度精度为±2%，台湾 KSON；温度记录仪，Agilent-34972 数据采集器搭载 34901A 模块（2 块）并与 K 型热电偶相连接，测温范围为 263~473 K，测量精度为±0.5 K，分辨率为 0.1 K，美国安捷伦；冰柜，DW-25W198，控温范围为 248~278 K，中国海尔；雪花制冰机，IMS-30-180W，制冰速度为 30 kg/d，常熟雪科电器。

EPP 导热系数通过热特性分析仪测得，称量可得 EPP 保温箱的质量，然后运用排水法测得 EPP 保温箱的体积，最后即可求得 EPP 的密度。EPP 保温箱的各项热参数见表 1。

| 表 1 EPP 保温箱的热参数                                |                                                |                              |                                                |
|------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------------------------|
| Tab.1 Thermal parameters of EPP insulating box |                                                |                              |                                                |
| 热参数                                            | 导热系数/<br>(W·m <sup>-1</sup> ·℃ <sup>-1</sup> ) | 密度/<br>(kg·m <sup>-3</sup> ) | 比热容/<br>(J·kg <sup>-1</sup> ·℃ <sup>-1</sup> ) |
| EPP                                            | 0.043                                          | 54                           | 1680 <sup>[17]</sup>                           |
| 冰                                              | 2.22                                           | 900                          | 2100                                           |
| 水                                              | 0.6                                            | 1000                         | 4200                                           |

2.2 方法

- 1) 取 8 个温度记录仪 K 型热电偶探头，均匀分布在保温箱内，用以测量保温箱内碎冰的温度场。
- 2) 添加碎冰到保温箱内并压实，当碎冰高度是保温箱内壁高度一半时停止添加碎冰，然后将用支架固定好的一个温度记录仪探头放置到碎冰表面，用以测定碎冰中温度的变化。支架为细铁丝制作成的十字架，长短边分别为保温箱内径长宽，探头固定在十字架中心。
- 3) 继续添加碎冰到保温箱内并压实，当碎冰充满保温箱时停止添加碎冰，然后添加适量的水填充碎冰之间的间隙。
- 4) 将上述的保温箱放置到 -20℃ 的恒温恒湿箱中，然后打开温度记录仪记录碎冰温度，初始时 9 个测点的温度在 -0.5~1℃ 之间，当 9 个测点的温度均低于 -2℃ 时，将恒温恒湿箱的温度调到 -2℃，并将保

温箱箱盖盖上, 另将一探头贴置在控温包装箱外壁上, 用于监测碎冰外箱壁温度。

5) 当所有温度记录仪探头记录的数据大小在  $-2^{\circ}\text{C}$  左右, 且误差不超过  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  时, 将恒温箱温度设定为  $42^{\circ}\text{C}$  进行实验。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 EPP 保温箱实测与 Comsol 模拟结果比较

EPP 保温箱实测与 Comsol 模拟结果的比较见图 2。有限元模拟的 EPP 保温箱的保温时间为 22 h, 实验实测的保温时间为 22.8 h, 模型预测的时间要比实测时间早 0.8 h, 即模型较安全且误差为 3.5%, 故文中建立的分析模型能有效预测 EPP 保温箱的保温性能。

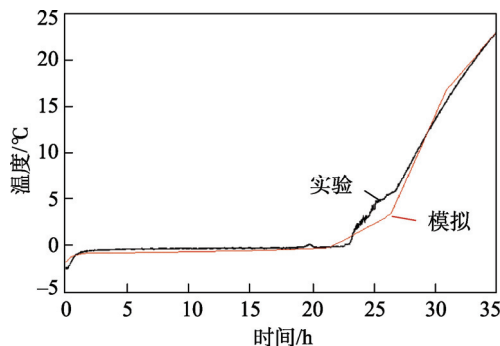


图2 传热过程中冰块中心点温度的变化

Fig.2 Temperature change of the center point of ice during heat transfer

#### 3.2 箱型结构对 EPP 保温箱保温性能的影响

冷链物流中常用的 EPP 保温箱有 2 种: 内容积为 35 L, 壁厚为 30 mm, 长度(内尺寸)为 500 mm; 内容积为 45 L, 壁厚为 35 mm, 长度(内尺寸)为 550 mm。不同箱型结构的保温箱保温时间不同, 表面积越大越易吸热; 体积越大蓄冷剂越多, 可吸收更多热量; 厚度越大, 热量越难进入保温箱。由此, 保温时间是一个综合影响因素<sup>[18]</sup>。文中在验证有限元模拟分析有效的基础上, 进一步研究在相同内容积、箱体厚度和箱盖厚度条件下, EPP 保温箱长宽比对其保温性能的影响。分析选择的 EPP 保温箱基本几何参数见表 2。

基于 Comsol 模型分别对不同长宽比下 35 和 45 L 的保温箱施加热载荷, 并求得冰块中心点的温度, 以冰块中心点的温度超过相变温度的时间为有效保温时间。内外表面积几何平均值不同时, 2 种型号 EPP 保温箱的保温时间见图 3。长宽比与内外表面积几何平均值之间的关系见图 4。

结果表明, 随着内外表面积几何平均值的增加, 保温时间逐渐减小, 故设计 EPP 保温箱结构时, 在不影响其他功能的前提下, 应尽量减少 EPP 保温箱内外表面积的几何平均值。在保温箱内容积、箱体厚度和箱盖厚度相同的情况下, 长宽比和内外表面积几何平均值为非独立变量; 长宽比增大时, 内外表面积几何平均值先减小后增大, 且长宽比在 1.8 ~ 2.0 之间时,

表 2 不同长宽比 EPP 保温箱的基本尺寸

Tab.2 Basic size of EPP insulating boxes with different length-width ratios

| 内容积/L | 长宽比 | 内尺寸/mm          | 外尺寸/mm          | 内表面积/mm <sup>2</sup> | 外表面积/mm <sup>2</sup> | 表面积几何平均值/mm <sup>2</sup> |
|-------|-----|-----------------|-----------------|----------------------|----------------------|--------------------------|
| 35    | 1.0 | 500 × 500 × 140 | 560 × 560 × 200 | 780 000              | 1 075 200            | 915 781                  |
|       | 1.2 | 500 × 416 × 168 | 560 × 476 × 228 | 724 666              | 1 006 586            | 854 072                  |
|       | 1.4 | 500 × 357 × 196 | 560 × 417 × 256 | 693 142              | 967 497              | 818 910                  |
|       | 1.6 | 500 × 312 × 224 | 560 × 372 × 284 | 676 500              | 946 860              | 800 344                  |
|       | 1.8 | 500 × 277 × 252 | 560 × 337 × 312 | 669 777              | 938 524              | 792 844                  |
|       | 2.0 | 500 × 250 × 280 | 560 × 310 × 340 | 670 000              | 938 800              | 793 092                  |
|       | 2.2 | 500 × 227 × 308 | 560 × 287 × 368 | 675 272              | 945 338              | 798 975                  |
|       | 2.4 | 500 × 208 × 336 | 560 × 268 × 396 | 684 333              | 956 573              | 809 082                  |
|       | 2.6 | 500 × 192 × 364 | 560 × 252 × 424 | 696 307              | 971 421              | 822 440                  |
|       | 2.8 | 500 × 178 × 392 | 560 × 238 × 452 | 710 571              | 989 108              | 838 350                  |
| 45    | 3.0 | 500 × 166 × 420 | 560 × 226 × 480 | 726 666              | 1 009 066            | 856 303                  |
|       | 1.0 | 550 × 550 × 148 | 620 × 620 × 218 | 932 272              | 1 311 325            | 1 105 673                |
|       | 1.2 | 550 × 458 × 178 | 620 × 528 × 248 | 864 166              | 1 225 883            | 1 029 255                |
|       | 1.4 | 550 × 392 × 208 | 620 × 462 × 278 | 824 870              | 1 176 584            | 985 154                  |
|       | 1.6 | 550 × 343 × 238 | 620 × 413 × 308 | 803 579              | 1 149 874            | 961 257                  |
|       | 1.8 | 550 × 305 × 267 | 620 × 375 × 337 | 794 292              | 1 138 223            | 950 832                  |
|       | 2.0 | 550 × 275 × 297 | 620 × 345 × 367 | 793 409              | 1 137 114            | 949 840                  |
|       | 2.2 | 550 × 250 × 327 | 620 × 320 × 397 | 798 636              | 1 143 672            | 955 708                  |
|       | 2.4 | 550 × 229 × 357 | 620 × 299 × 427 | 808 446              | 1 155 980            | 966 720                  |
|       | 2.6 | 550 × 211 × 386 | 620 × 281 × 456 | 821 783              | 1 172 711            | 981 689                  |
|       | 2.8 | 550 × 196 × 416 | 620 × 266 × 486 | 837 889              | 1 192 917            | 999 766                  |
|       | 3.0 | 550 × 183 × 446 | 620 × 253 × 516 | 856 212              | 1 215 904            | 1 020 329                |

内外表面积几何平均值最小。

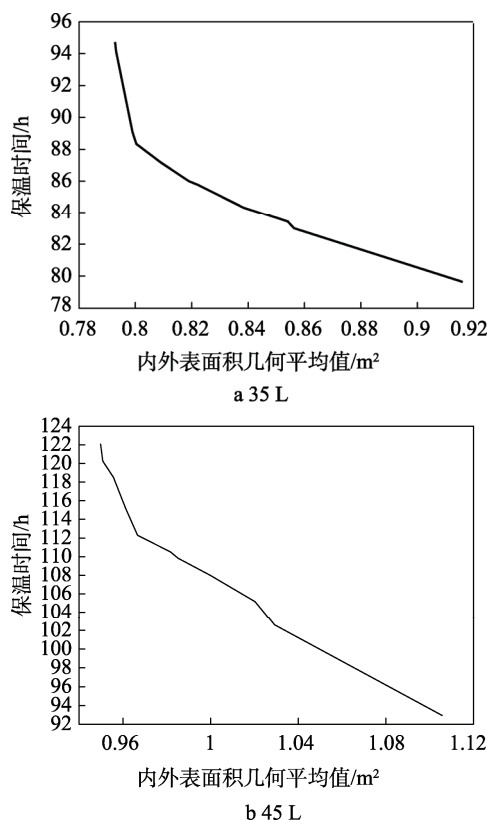


图 3 不同内外表面积几何平均值对保温时间的影响  
Fig.3 Effect of different geometric means of internal and external surface areas on holding time

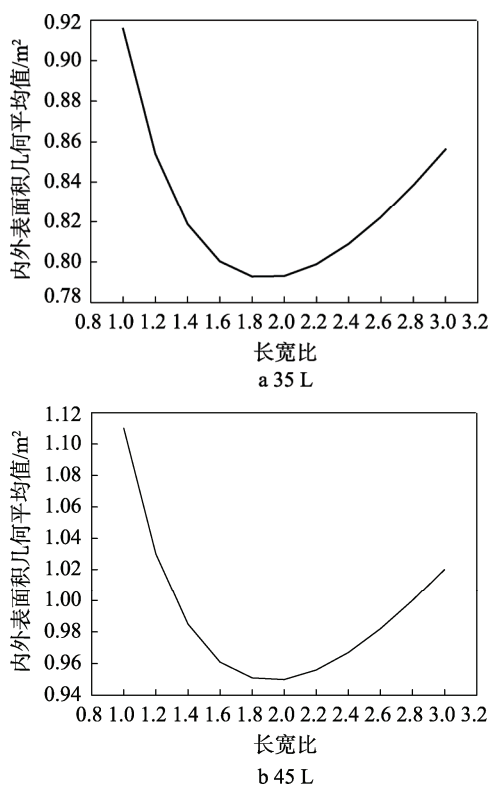


图 4 长宽比与内外表面积几何平均值之间的关系  
Fig.4 The relationship between the length-width ratio and the geometric mean of the internal and external surface areas

进一步分析不同长宽比对保温时间的影响, 见图 5, 随着长宽比的增大, 2 种型号 EPP 保温箱保温时间呈先增大后减小的趋势; 长宽比在 1.8~2.0 之间时, 保温时间最长。在设计 EPP 保温箱结构时, 当内容积在 35~45 L 之间, 且箱体厚度和箱盖厚度相同的情况下, 应尽量将长宽比控制在 1.8~2.0 之间。

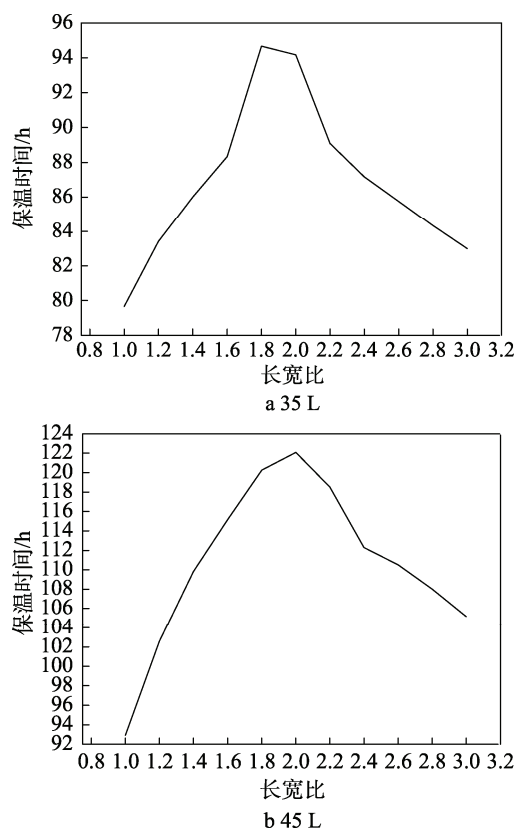


图 5 长宽比对 EPP 保温箱保温时间的影响  
Fig.5 Effect of different length-width ratios on holding time of EPP insulating box

#### 4 结语

冷链物流 EPP 保温箱的实际箱型较为复杂, 当内容积在 35~45 L 之间, 且箱体厚度和箱盖厚度相同时, 把长宽比控制在 1.8~2.0 之间可有效减小内外表面积几何平均值, 从而提高保温箱保温性能。由此在设计 EPP 保温箱结构时可适当控制长宽比以减小表面积, 并由此确定 EPP 保温箱的最优化结构, 从而延长保温时间。

#### 参考文献:

- [1] 张仁元. 相变材料与相变储能技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009.  
ZHANG Ren-yuan. Phase Change Materials and Phase Change Energy Storage Technology[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [2] PAOLI L, PETROV A. Global Solutions to Phase Change Models with Heat Transfer for a Class of

- Smart Materials[J]. Nonlinear Analysis: Real World Applications, 2014, 17: 47—63.
- [3] 刘本刚, 张玉霞, 王向东, 等. 聚丙烯发泡材料的应用及研究进展[J]. 塑料制造, 2006(6): 82—86.  
LIU Ben-gang, ZHANG Yu-xia, WANG Xiang-dong, et al. Application and Research Progress of Polypropylene Foaming Material[J]. Plastic Manufacturing, 2006(6): 82—86.
- [4] 潘嘹, 卢立新, 王军. 控温包装控温时间预测模型研究[J]. 包装工程, 2014, 35(5): 27—30.  
PAN Liao, LU Li-xin, WANG Jun. Study on Temperature Predicting Model of Temperature Control Package[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(5): 27—30.
- [5] 董鹏, 陈继展. 冷链物流: 困局与走向[J]. 进出口经理人, 2015(7): 80—82.  
DONG Peng, CHEN Ji-zhan. Cold Chain Logistics: Dilemma and Trend[J]. Import and Export Manager, 2015(7): 80—82.
- [6] 孙统超. 浅谈我国冷链物流存在的问题以及对策[J]. 价值工程, 2014, 33(31): 22—23.  
SUN Tong-chao. Discussion on the Problems and Countermeasures of Cold Chain Logistics in China[J]. Value Engineering, 2014, 33(31): 22—23.
- [7] QIAN Jing. Mathematical Models for Insulating Packages and Insulating Packaging Solutions[D]. Memphis: The University of Memphis, 2010.
- [8] 郭晓娟, 钱静. 基于 ANSYS 保温包装球壳模型的建立[J]. 包装工程, 2011, 32(5): 43—48.  
GUO Xiao-juan, QIAN Jing. Establishment of Spherical Shell Model Based on ANSYS Insulation[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(5): 43—48.
- [9] 赵艳冰. 基于圆柱体模型的温控包装数模建立及应用[D]. 无锡: 江南大学, 2013.  
ZHAO Yan-bing. Modeling and Application of Temperature Control Package Based on Cylinder Model[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013.
- [10] BURGESS G. Practical Thermal Resistance and Ice Requirement Calculations for Insulating Packages[J]. Packaging Technology & Science, 1999, 12(2): 75—80.
- [11] MATSUNAGA K, BURGESS G, LOCKHART H. Two Methods for Calculating the Amount of Refrigerant Required for Cyclic Temperature Testing of Insulated Packages[J]. Packaging Technology & Science, 2007, 20(2): 113—123.
- [12] 袁玮, 许文才. PET 啤酒瓶有限元分析及其结构参数的确定[J]. 包装工程, 2009, 30(12): 24—26.  
YUAN Wei, XU Wen-cai. Finite Element Analysis of PET Beer Bottle and Determination of Structural Parameters[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(12): 24—26.
- [13] 王刚. COMSOL Multiphysics 工程实践与理论仿真——多物理场数值分析技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.  
WANG Gang. COMSOL Multiphysics Engineering Practice and Theory Simulation-Multiple Physical Field Numerical Analysis Technique[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2012.
- [14] 菅宗昌. 典型潜热型控温包装热传递过程模拟[D]. 无锡: 江南大学, 2014.  
JIAN Zong-chang. Simulation of Heat Transfer Process in Typical Latent Heat Packaging[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014.
- [15] ZIMMERMAN W. COMSOL Multiphysics Modeling and Analysis of Multiphysics Fields by Finite Element Method[M]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [16] 张寅平. 冰蓄冷研究的现状与展望[J]. 暖通空调, 1997(6): 25—30.  
ZHANG Yin-ping. Present Situation and Prospect of Research on Ice Thermal Storage[J]. Heating Ventilating and Air Conditioning, 1997(6): 25—30.
- [17] 胡少强, 张少民. 聚丙烯保温材料连续比热容的测定[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2005, 3(3): 35—37.  
HU Shao-qiang, ZHANG Shao-min. Determination of Continuous Specific Heat Capacity of Polypropylene Insulating Material[J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2005, 3(3): 35—37.
- [18] CHOI S J. Mathematical Models to Predict the Performance of Insulating Packages and Their Practical Uses[D]. East Lansing: Michigan State University, 2004.